

靴形喷射对柴油机排放和性能影响的模拟研究

Simulation study on influence of Boot Injection on diesel emissions and performance

胡芳 吕晓刚 刘江唯 包宁 金华玉

(一汽解放商用车开发院, 长春市, 邮编 130011)

摘要: 本文基于 13L 柴油机, 利用三维 CFD 软件 converge 结合一维 modeFRONTIER 进行敏感性分析, 通过对柴油靴形喷射的缸内过程模拟和优化, 得到了通过喷油规律调整在国 VI 同等 NO_x 比排放前提下, 提高发动机有效热效率的途径。

关键词: 柴油机, 排放, 模拟, 靴形喷射

Abstract: Based on a 13L diesel engine, the method of increasing engine heat efficiency under CN6 NO_x limitation by optimizing diesel boot injection shape was gained. The simulation was carried out by 3D software of converge and sensibility analysis was by 1D modeFRONTIER.

Key words: diesel engine, emission, simulation, boot injection

1. 背景

柴油机燃烧技术的不断更新, 主要是基于新型燃烧方式, 依赖高压电控燃油喷射系统, 以实现分段可控的燃烧放热, 最终达成 NO_x 排放和油耗之间的平衡。

本文基于一款 13L 国 6 柴油机, 利用三维 CFD 软件 converge 结合一维 modeFRONTIER, 通过对虚拟靴形喷射的缸内过程模拟和参数敏感性分析, 优化靴形喷油规律, 完成 2400bar 靴形喷射对燃烧和排放影响的研究。得到了通过喷油规律调整在国 VI 同等 NO_x 比排放前提下, 降低比油耗, 提高发动机有效热效率的途径。

2. 计算方法

计算过程如下:

- 1) 三维 CFD 分析软件 converge 完成基础模型建模, 基于试验数据进行基础模型校核;
- 2) 基于 converge 基础模型, 完成靴形喷油规律变参数的缸内过程模拟;
- 3) 基于优化软件 modeFRONTIER 完成喷油规律的多目标参数敏感性分析;
- 4) 基于敏感性分析结果完成优化的靴形喷油缸内过程模拟。

3. 结果及分析

3.1 converge 基础模型建模及校核

3.1.1 发动机基本参数

13L 发动机基本参数如表 1:

表 1 发动机基本信息

项目	单位	数据
排量	L	13
缸径	mm	126.5
冲程	mm	166
气门数/缸	—	4
连杆长	mm	261
压缩比	—	17.6
涡流比 R_s	—	1.5
EGR 率	%	12

应用 converge 软件建立 1/8 燃烧室模型，对应 8 孔喷油嘴的其中 1 孔。计算模型如图 1。

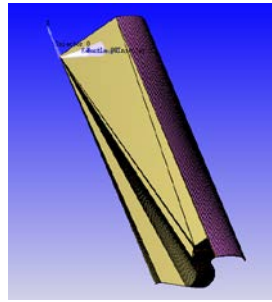


图 1 计算模型

3.1.2 计算工况

选择 13L 发动机最大扭矩工况（1200rpm，100%负荷）进行模拟计算，该工况对整车经济性以及发动机经济性和排放特性影响较大。选择进气门关闭到排气门开启时刻为计算区间，进气门关闭时刻进气压力和温度条件来自于 GT-Power 基于试验数据的模拟计算。

基础工况喷油规律如图 2 所示，数据来自于无锡油泵所 13L 匹配的 BOSCH 3 代喷油器做的台架试验测试数据。

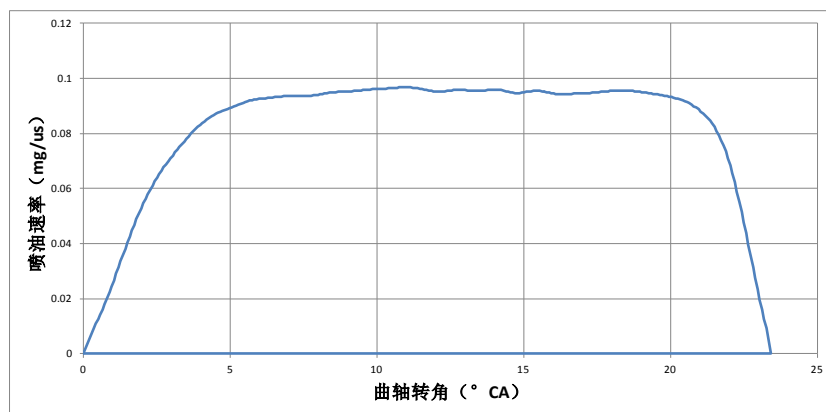


图 2 喷油速率

3.1.3 物理模型

选择 C_7H_{16} 代替柴油进行计算分析，计算模型如表 2 所示。

表 2 计算模型的选择

湍流模型	Reynolds Averaged Navier-Stokes (RANS)
燃烧模型	The SAGE Detailed Chemistry Solver
油滴运动模型	O' Rourke model
油滴蒸发模型	Frossling Model
碰撞/破碎模型	NTC collision
油滴撞壁模型	Wall film
破碎模型	KH model
氮氧化物	Extended Zeldovich NOx model
SOOT 模型	Hiroyasu Soot model

3.1.4 校核结果

图 3 所示为模拟计算得到的缸压与试验结果对比,表 3 为通过缸压计算得到的有效功率和有效比油耗对比结果。有效功率计算中采用的缸压,压缩和燃烧部分来自模拟,其余来自试验。从结果可以看出,模拟结果与试验结果吻合,精度达到 99%,所建立的数值模型可以用来模拟发动机的真实工况,文中采用的均为此模型。

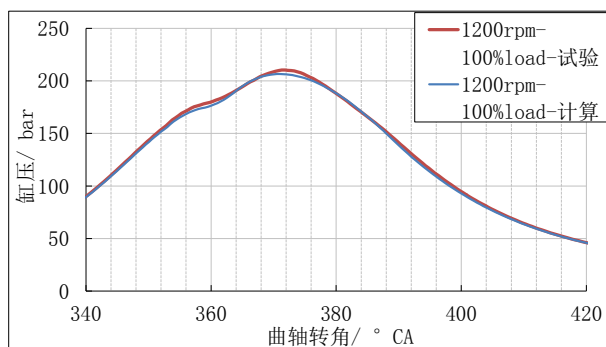


图 3 计算与试验缸压对比

表 3 模拟结果与试验结果对比

项目	单位	试验	模拟	精度
转速	rpm	1200	1200	-
循环油量	kg/h	65.08	65.08	-
有效功率	kW	339.12	338.5	99%
有效比油耗	g/kW.h	191.18	192.2	99%

3.2 结果及分析

3.2.1 参数敏感性分析

在同等油量工况下,与矩形喷油规律相比,靴形喷油规律可以调整的参数包括靴形喷油压力 P_{boot} 、主喷油压力 P_{main} 、靴形油量比例 $boot_ratio$ 、喷油正时 T_{soi} 、靴形喷油正

时 T_{soi1} 、主喷油正时 T_{som} 、喷油结束斜率等，见图 4，图中红色线为带有预喷射的矩形喷油规律，紫色线表示靴形喷油规律。靴形喷油规律参数点定义见图 5。

改变这几个主要参数形成不同的喷油规律，选择约 300 个不同方案，进行缸内过程模拟分析，并应用 modeFRONTIER 软件对计算结果进行参数敏感性分析，分析结果如图 6 所示。图中横坐标参数即有效比氮氧 BSNO，纵坐标参数为有效比油耗 BSFC。黄色数据点代表计算结果超出约束的无效数据点，即碳烟 $>0.03\text{g/kW}\cdot\text{h}$ ，或最大爆发压力 $P_{max}>250\text{bar}$ 的无效点，绿色数据点为满足以上约束并达到氮氧化物排放目标（BSNO 介于 $6.8\sim 7.2\text{g/kW}\cdot\text{h}$ ）的油耗最低点。可以看到，在满足氮氧化物排放目标和碳烟以及最大爆发压力的约束条件下，有效比油耗可以比校核基础点降低 2%。图中黑色圆圈指示的为校核基础点。

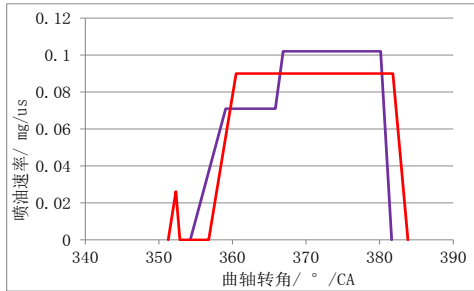


图 4 靴形喷油规律与矩形喷油规律对比

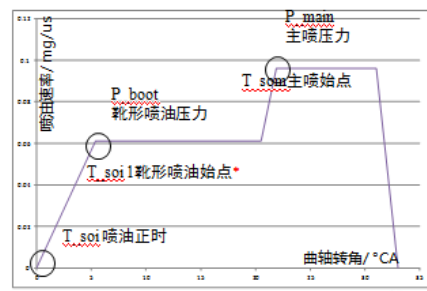


图 5 靴形喷油规律参数定义

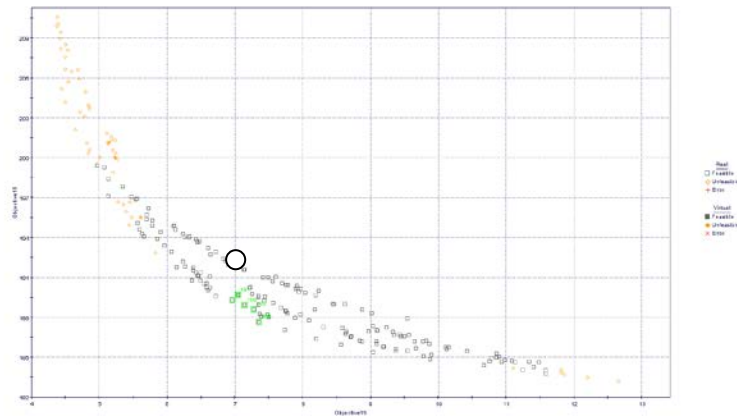


图 6 数据点比氮氧-比油耗关系图

表 4 是 BSFC/BSNO/BSSOOT 三个目标的皮尔森相关性结果：

从表 4 看出与目标相关性最大的参数有三个：

- ① P_{boot} 靴形喷射压力
- ② T_{soi1} 靴形喷油始点（取决于靴形喷油速率）
- ③ T_{som} 主喷始点（取决于靴形喷油始点+靴形喷油压力+靴形油量比例）

以上三个参数最终可以归结为靴形喷射压力和靴形喷油速率的影响。

表 4 中还可以看到与目标相关性最小的是 P_{main} 即主喷压力，由于该工况下 BSSOOT 生成量较小，主喷油压力的影响未能体现。

下面分别对靴形喷射压力和靴形喷油速率的影响进行详细分析。

表 4 BSFC/BSNO/BSSOOT 三个目标的皮尔森相关性结果

	P_{boot}	P_{main}	T_{soi}	T_{soi1}	T_{som}	boot_ratio
BSFC	-0.75	-0.08	0.49	0.77	0.70	0.27
BSNO _x	0.83	0.09	-0.44	-0.83	-0.68	-0.23
BSSOOT	-0.56	-0.20	0.12	0.60	0.61	0.25

3.2.2 靴形喷射压力与结果关系分析

靴形喷射压力与三个目标结果相关性最大，图 7 (a) (b) (c) (d) 显示了靴形喷油比例 40% 前提下比氮氧 BSNO 和比油耗 BSFC 分别在靴形喷射压力为 600bar、800bar、1000bar 和 1200bar 的折中关系，图中不同颜色线条表示不同的主喷射压力，同一线条上三个不同的点为不同喷油正时。对比 (a) (b) (c) (d) 四图可以看出，随着靴形喷油压力增大，BSNO 增大的趋势显著，而靴形喷油压力相同的前提下主喷射压力的变化几乎对结果没有影响。图 8 为相同主喷射压力下不同靴形喷射压力对比曲线，从图中可以很明显看到靴形喷油压力增大时 BSNO 和 BSFC 折中关系的恶化趋势。

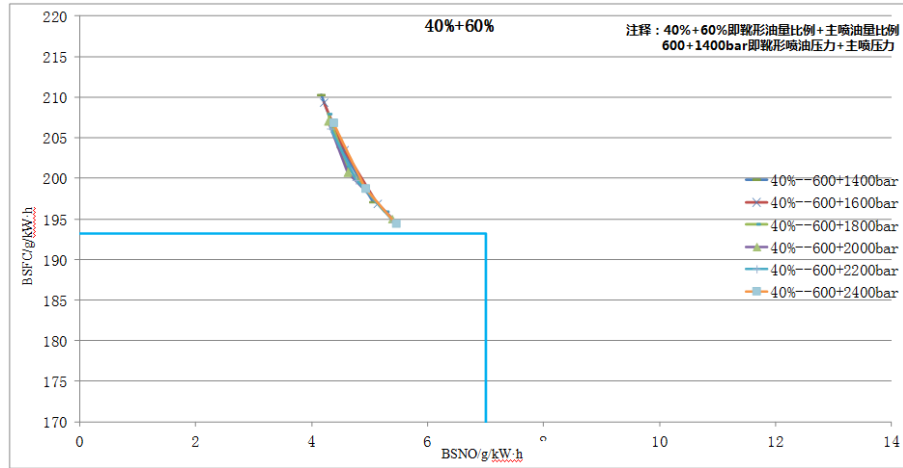


图 7 (a) 靴形喷油压力 600bar 不同主喷压力下 BSNO 和 BSFC 折中曲线

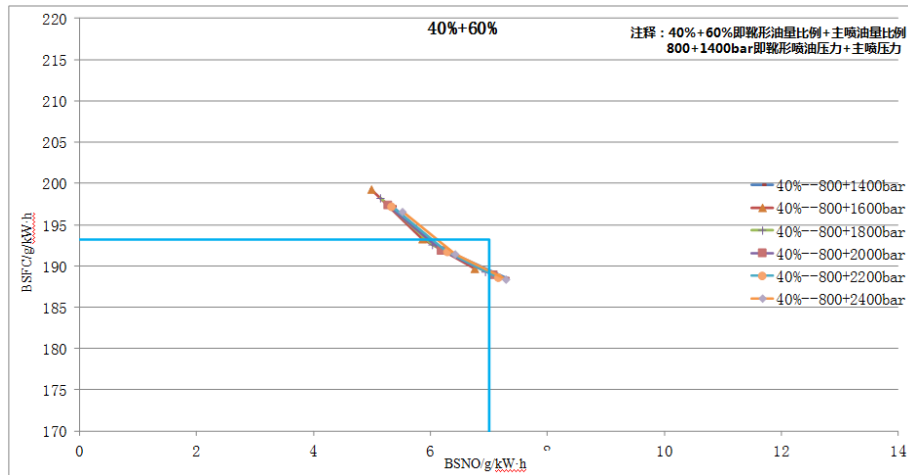


图 7 (b) 靴形喷油压力 800bar 不同主喷压力下 BSNO 和 BSFC 折中曲线

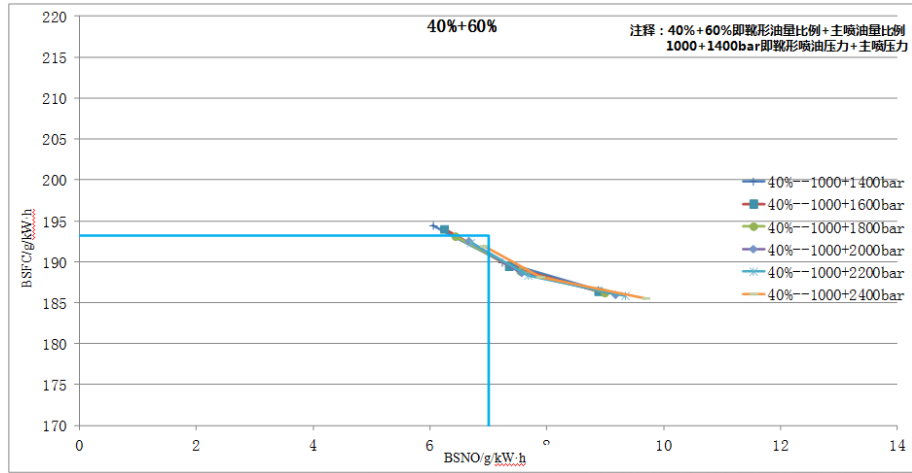


图 7 (c) 靴形喷油压力 1000bar 不同主喷压力下 BSNO 和 BSFC 折中曲线

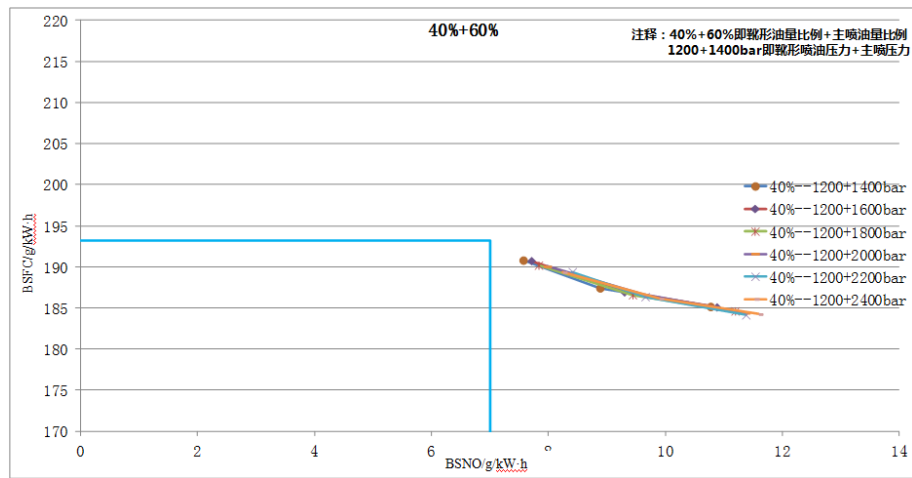


图 7 (d) 靴形喷油压力 1200bar 不同主喷压力下 BSNO 和 BSFC 折中曲线

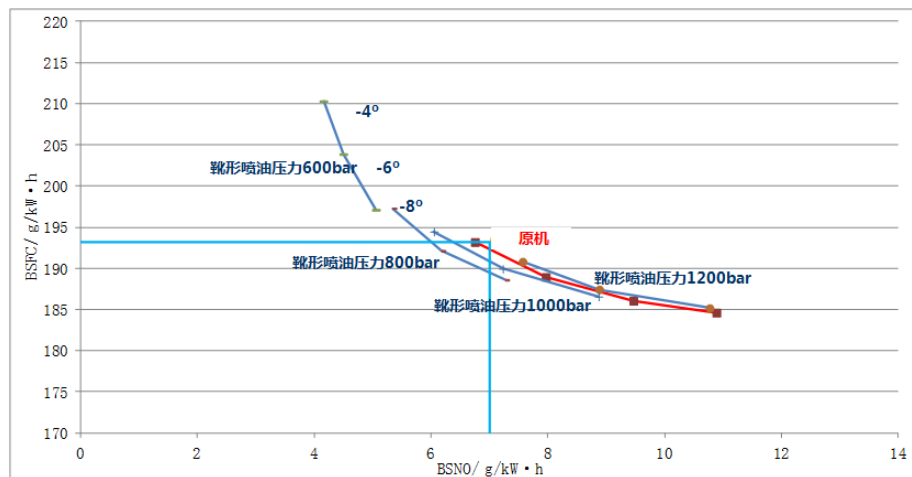


图 8 不同靴形喷油压力下 BSNO 和 BSFC 折中曲线

图 9 (a) (b) (c) (d) 显示了比氮氧 BSNO 和比碳烟 BSSOOT 分别在靴形喷射压力为 600bar、800bar、1000bar 和 1200bar 的折中关系, 图中不同颜色线条表示不同的主喷射压力, 同一线条上三个不同的点为不同喷油正时。可以看出, 随着靴形喷油压力增大, BSSOOT 整体减小。当靴形喷射压力为 600bar 时, 见图 9 (a), 主喷射压力增大有利于降低 BSSOOT。靴形喷射压力高于 800bar, 见图 9 (b)、(c)、(d), 主喷射压力对 BSSOOT 影响较小。同时

从图中不难看出，靴形喷射压力高于 800bar 时，采用靴形喷射 BSSOOT 排放普遍低于原机，而原机采用 1400bar 矩形喷射。

可以得出以下结论，靴形喷油压力对 BSNO、BSSOOT、BSFC 的综合影响显著，降低靴形喷油压力有利于燃油经济性，但过低的靴形喷油压力 (<800bar) 会影响 SOOT 排放；

主喷油压力对 BSNO 和 BSFC 影响很小；合理选择靴形喷油压力 (>800bar) 时，主喷油压力对 BSSOOT 影响也不显著（结论限于此工况）。

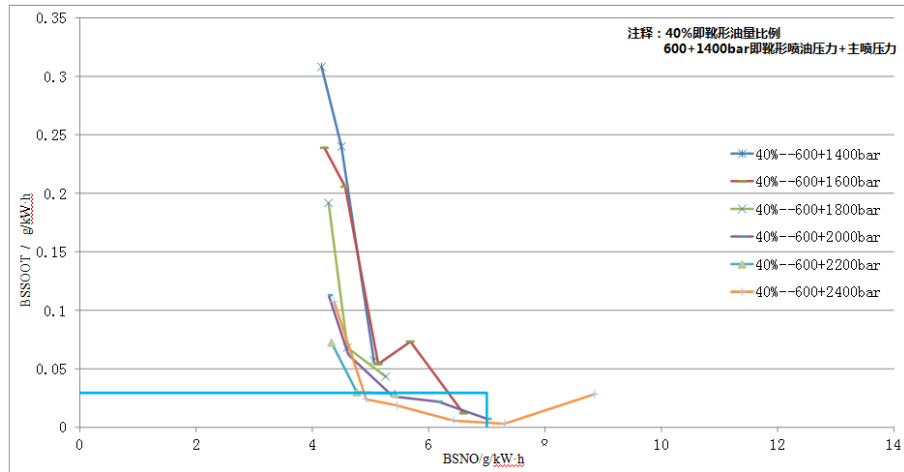


图 9 (a) 靴形喷油压力 600bar 不同主喷压力下 BSSOOT 和 BSFC 折中曲线

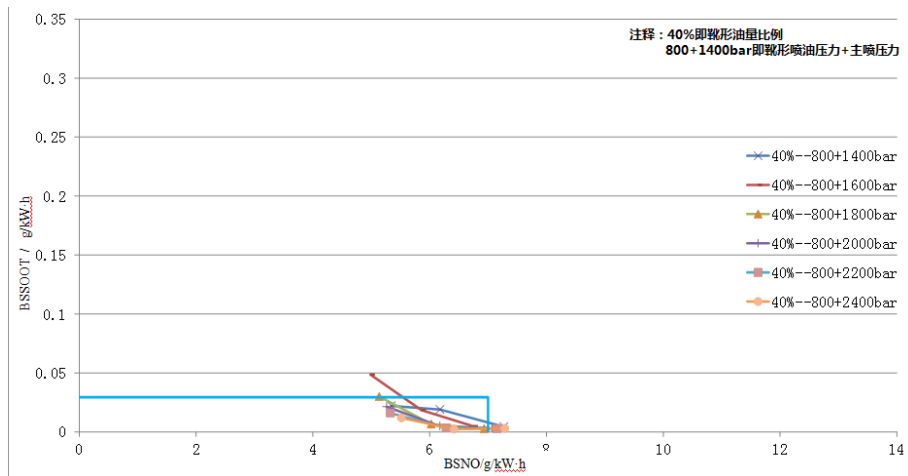


图 9 (b) 靴形喷油压力 800bar 不同主喷压力下 BSSOOT 和 BSFC 折中曲线

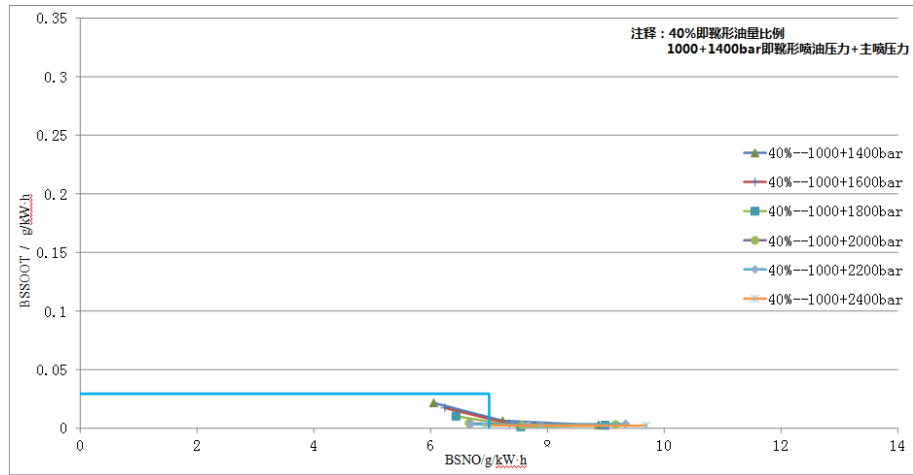


图 9 (c) 靴形喷油压力 1000bar 不同主喷压力下 BSSOOT 和 BSFC 折中曲线

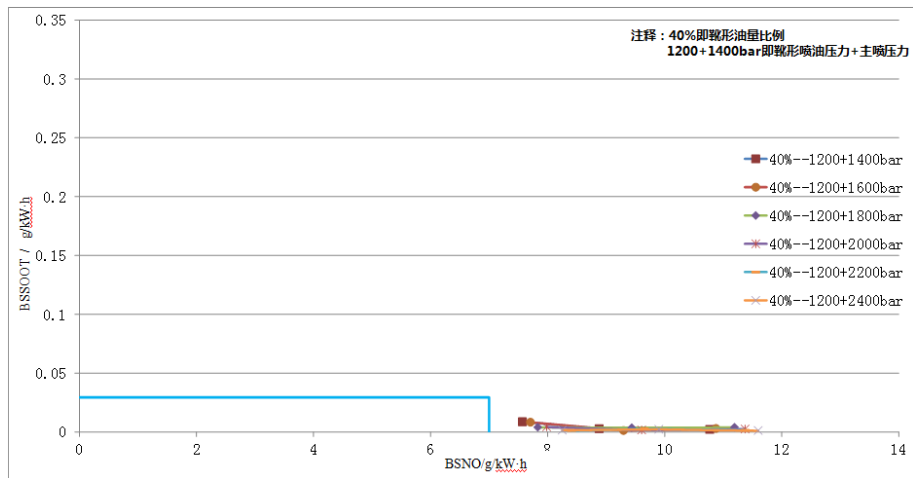


图 9 (d) 靴形喷油压力 1200bar 不同主喷压力下 BSSOOT 和 BSFC 折中曲线

3.2.3 靴形喷射速率与结果关系分析

保证靴形喷油量与总喷油量前提下, 推迟 T_{soil} (T_{soil} 定义为靴形喷油压力稳定始点见图 5), 即减缓靴形喷油速率, 得到不同的靴形喷油规律, 见图 10, 靴形喷油压力为 800bar。

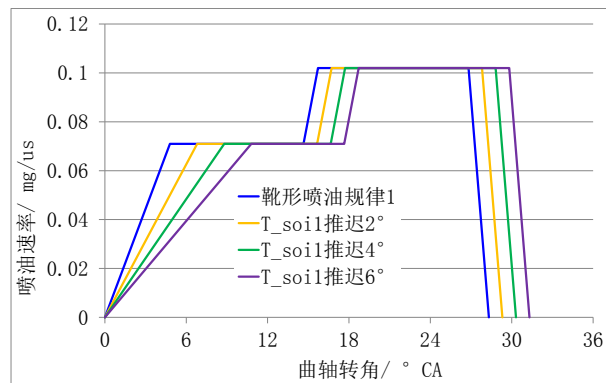


图 10 靴形喷油规律

图 11 为 BSNO 和 BSFC 模拟计算结果, 图 12 为 BSNO 和 BSSOOT 结果。图 11 和图

12 中黄色、绿色和紫色线条分别为靴形喷油压力始点较蓝色线喷油压力稳定始点推迟 2° 、 4° 、 6° 曲轴转角的结果，红色线条为原机矩形喷油规律结果。可以看出，随着 T_{soi1} 的推迟，BSFC 和 BSNO 综合性能有所改善，然而 BSSOOT 结果随之恶化。在 BSSOOT 不高于原机，BSNO 与原机相同的前提下， T_{soi1} 推迟 4° 时综合性能最好。

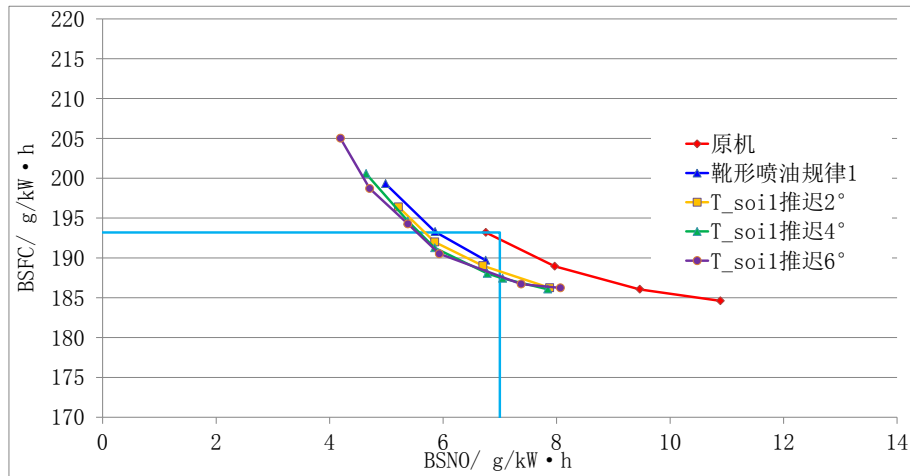


图 11 不同 T_{soi1} 时刻 BSFC 和 BSFC 折中曲线

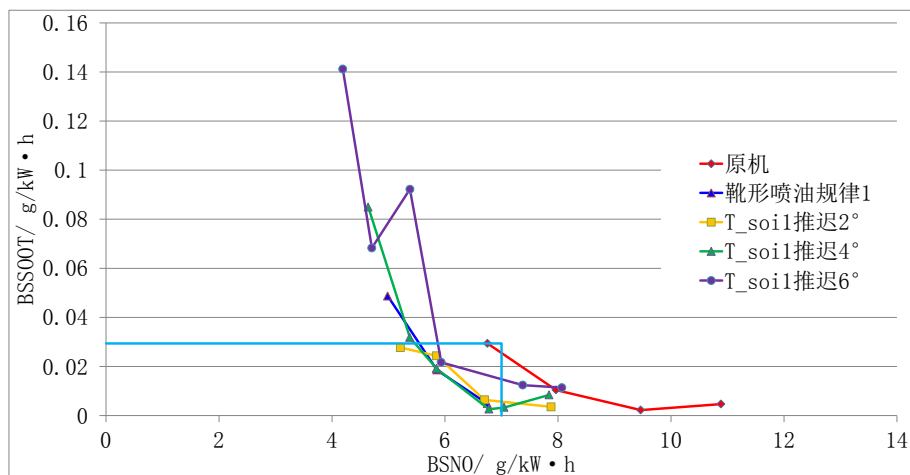


图 12 不同 T_{soi1} 时刻 BSSOOT 和 BSFC 折中曲线

3.2.4 采用靴形喷油规律结果与原机对比

综上，采用靴形喷油规律，选择合适的靴形喷油压力、靴形喷油速率等参数，可以在 BSSOOT 不增大的前提下改善 BSNO 和 BSFC 折中关系。经过筛选，采用了图 13 所示靴形喷油规律，靴形喷射压力 800bar，主喷射压力 1600bar，减缓靴形喷油速率并提前喷油，与原机相比，得到表 5 显示的结果。在同等 BSNO 前提下，BSFC 比原机降低 2.5%，BSSOOT 大幅度降低。

从图 14 缸内爆发压力对比结果看出，采用靴形喷油规律缸内压力（蓝色线）高于原机（红色线），在喷入同等油量的前提下，做功多于原机，BSFC 降低。图 15 放热率对比也显示了提前喷油的放热优势，统计结果燃烧重心 CA50 在上止点后 13° CA 出现（表 5），比基础机提早 3.4° CA，热效率提高。

从图 15 放热率对比中我们还可以看到，靴形喷油燃烧放热率的上升缓慢，峰值与矩形相当，因此尽管放热较早，却很好控制了燃烧温度见图 16，抑制了 NO 生成，见图 17。而矩形喷油燃烧放热率上升非常快速，这与喷油规律吻合。

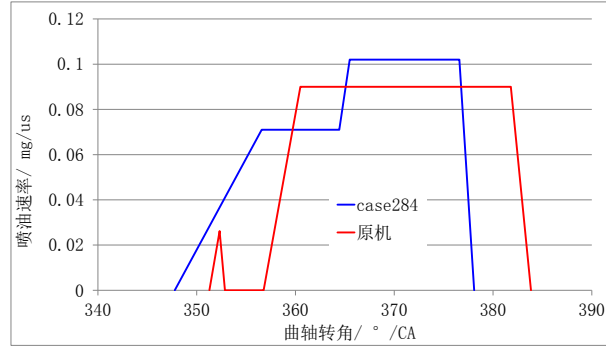


图 13. 靴形喷油规律与矩形喷油规律

表 5 靴形喷油与原机矩形喷油模拟结果对比

	T _{soi}	BSFC	BSSoot	BSNO	P _{max}	有效功率	CA10	CA50	CA90	DOC
	° CA ATDC	g/kW·h	g/kW·h	g/kW·h	bar	kW	° CA	° CA	° CA	° CA
原机	-4.5	192.2	0.03	6.97	206.6	338.5	364.6	376.4	392.0	27.4
case284	-12.5	187.4	0.003	7.04	237.2	347.2	359.8	373.0	390.8	31.0

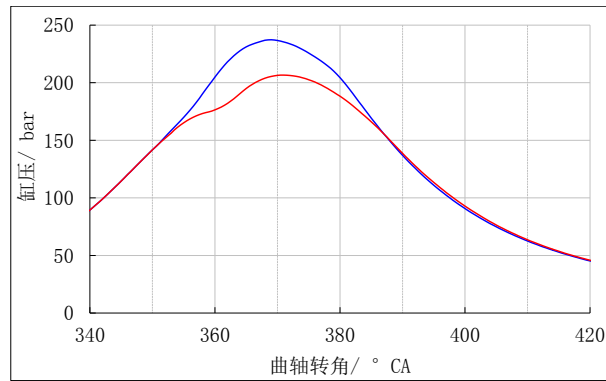


图 14 靴形喷油（蓝色）与矩形喷油（红色）喷油缸压对比

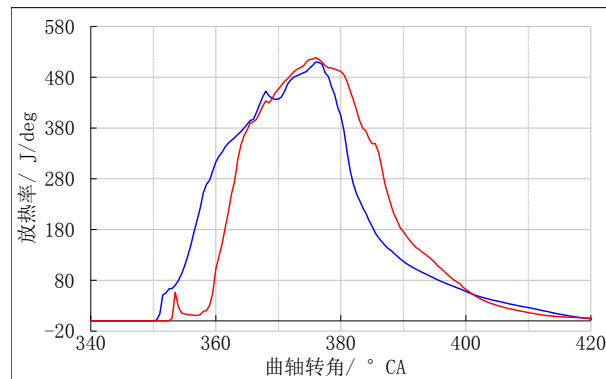


图 15 靴形喷油（蓝色）与矩形喷油（红色）放热率对比

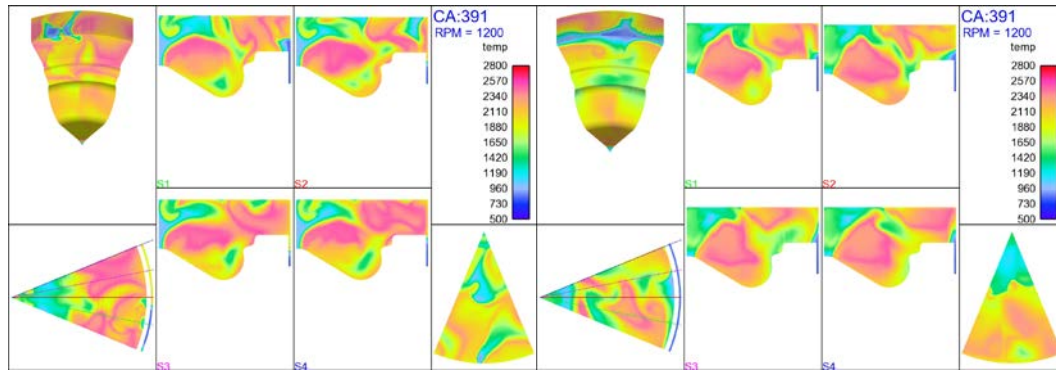


图 16 靴形喷油（右）与矩形喷油（左）温度对比

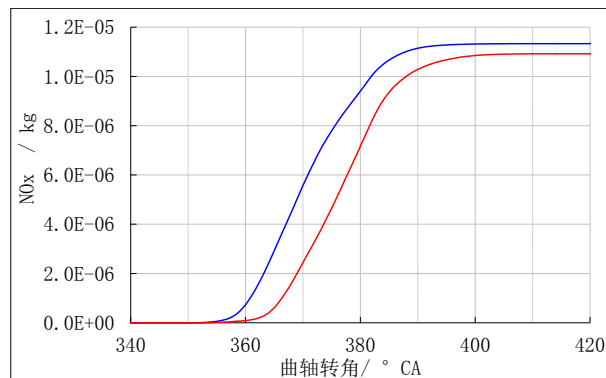


图 17 靴形喷油（蓝色）与矩形喷油（红色）NO 质量对比

4. 结论

在该 13L 柴油机 1200rpm, 100%负荷工况下, 对靴形喷油规律进行的模拟优化结论如下:

1. 与矩形喷油规律相比, 合理的靴形喷油规律可以在相同 BSNO 和 BSSOOT 排放下, 降低比油耗约 2.5%, 提升发动机热效率;
2. 靴形喷油压力和靴形喷油速率对 BSNO、BSSOOT、BSFC 的综合影响显著, 降低靴形喷油压力, 减缓靴形喷油速率有利于燃油经济性, 但过低的靴形喷油压力 (<800bar) 会影响 Soot 排放。